

# 生物医学领域碳纳米材料 10 年研究前沿与热点

党小雯, 黄海量, 黄雷, 王亚洁

<https://doi.org/10.12307/2024.812>

投稿日期: 2023-12-08

采用日期: 2024-01-16

修回日期: 2024-02-04

在线日期: 2024-02-21

中图分类号:

R459.9; R363; R364

文章编号:

2095-4344(2025)04-00752-09

文献标识码: A

## 文章快速阅读: 生物医学领域碳纳米材料研究现状

数据来源:  
在 Web of Science  
数据库中检索  
2012-2023 年发表  
的生物医学领域  
碳纳米材料的相  
关文献

CiteSpace  
可视化分析

发文量

研究主体

研究内容

国家

机构

作者

关键词

高被引文献

研究热点  
研究前沿

## 文题释义:

**碳纳米材料:** 是一组由碳元素组成的、纳米级别的天然或人造碳质材料, 根据其结构和尺寸分为零维、一维、二维和三维四类。由于其独特而优异的理化性质被广泛用于多种学科领域, 在生物医学领域, 碳纳米材料在药物递送、组织工程、癌症诊疗及抗菌等医学应用中具有巨大潜力。

**文献计量学:** 是指运用数学和统计学的方法, 综合分析研究的基本信息, 宏观概括该领域的发展现状, 揭示研究热点与前沿, 对后续研究有一定启示意义。

## 摘要

**背景:** 生物医学领域碳纳米材料的研究蓬勃发展, 相关科研成果逐年增加, 但此领域的年发文量、国家、机构、作者的研究情况及研究热点与趋势等内容的可视化分析相对匮乏。

**目的:** 展现生物医学领域碳纳米材料研究现状, 揭示主要的研究主体, 探索研究热点及发展趋势, 为此领域未来发展提供参考。

**方法:** 以Web of Science核心集数据库为文献来源, 检索2012-2023年生物医学领域碳纳米材料的相关文献, 运用Citespace软件以国家、机构、作者、关键词、共被引为节点生成知识图谱并进行可视化分析。

**结果与结论:** ①共纳入2 932篇文献, 碳纳米材料在医学领域年发文量多且增长速度较快; 美国发文量较多; 中国是该领域的新兴力量, 发文量虽然最多, 但研究水平和影响力还有待提高; 中国科学院是最大的合作网络机构, 主要以国内机构为合作对象, 缺少与国外知名单位的合作。②关键词分析显示, 碳点的绿色合成方式及应用是近年来的研究热点; 其次碳纳米材料与癌症光疗、免疫疗法相结合的新方法是未来研究中的重点方向。③共被引动态发展趋势提示, 组织工程是生物医学领域碳纳米材料的热点研究主题, 主要包括碳纳米材料对于心脏和神经组织修复和再生的研究以及作为3D和4D生物打印的生物墨水添加剂。④未来随着生物医学领域朝着以治疗为中心的精准方向发展, 科研人员应加快创建科学有效的碳纳米材料与科技、新型聚合物或有机分子及新治疗方法等结合形成的碳基体系, 发挥碳纳米材料的最大效应。

**关键词:** 碳纳米材料; 生物医学; 可视化; 共被引; 文献计量学; 生物安全性; 研究热点; 癌症; 组织工程; Citespace

## Research frontiers and hotspots of carbon nanomaterials in biomedical field over the past 10 years

Dang Xiaowen, Huang Hailiang, Huang Lei, Wang Yajie

Rehabilitation Medicine School of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China

Dang Xiaowen, Master candidate, Rehabilitation Medicine School of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China

**Corresponding author:** Huang Hailiang, MD, Professor, Rehabilitation Medicine School of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China

## Abstract

**BACKGROUND:** Research on carbon nanomaterials in the biomedical field is booming, and related scientific research results are increasing year by year.

However, visualization analysis of the annual number of publications, the research status of countries, institutions, authors, and research hotspots and trends in this field is relatively scarce.

**OBJECTIVE:** To present the research status of carbon nanomaterials in biomedical field, reveal the main research subjects, explore the research hotspots and development trends, and provide a reference for the future development of this field.

山东中医药大学康复医学院, 山东省济南市 250355

第一作者: 党小雯, 女, 1999年生, 山东省滕州市人, 汉族, 山东中医药大学在读硕士, 主要从事中西医结合康复技术实践与循证评价研究。

通讯作者: 黄海量, 博士, 教授, 山东中医药大学康复医学院, 山东省济南市 250355

<https://orcid.org/0009-0000-9472-2933> (党小雯); <https://orcid.org/0000-0003-1186-4501> (黄海量)

基金资助: 山东省名老中医药刘昭纯传承工作室建设项目(鲁卫中发展字[2018]1号), 项目负责人: 黄海量

引用本文: 党小雯, 黄海量, 黄雷, 王亚洁. 生物医学领域碳纳米材料 10 年研究前沿与热点 [J]. 中国组织工程研究, 2025,

29(4):752-760.



**METHODS:** The core data set of Web of Science was used as the literature source to search the relevant researches on carbon nanomaterials in the biomedical field from 2012 to 2023. The knowledge map was generated by using Citespace software with countries, institutions, authors, keywords, and co-citations as nodes and for visualization analysis.

**RESULTS AND CONCLUSION:** (1) A total of 2 932 papers were included in this study. In the medical field, carbon nanomaterials had a large number of papers and a fast growth rate. The United States has a large number of papers; China is an emerging force in this field, although the number of papers is the largest, but the level of research and influence need to be improved. The Chinese Academy of Sciences is the largest cooperative network institution, which mainly targets domestic institutions and lacks cooperation with well-known foreign institutions. (2) Keyword analysis displays that the green synthesis method and application of displaying carbon points have been the focus of research, followed by the new method of combining carbon nanomaterials with cancer phototherapy and immunotherapy, the key direction of future research. (3) The dynamic development trend of co-citations suggests that tissue engineering is a hot research topic of carbon nanomaterials in the field of biomedicine, mainly including the research of carbon nanomaterials for the repair and regeneration of heart and nerve tissue and as a bio-ink additive for 3D and 4D bioprinting. (4) In the future, with the development of the biomedical field in the direction of precision and treatment, researchers should speed up the creation of carbon-based systems formed by the combination of scientific and effective carbon nanomaterials with science and technology, new polymers or organic molecules, and new therapeutic methods, so as to give full play to the maximum effect of carbon nanomaterials.

**Key words:** carbon nanomaterial; biomedicine; visualization; co-citation; bibliometrics; biosafety; research hotspot; cancer; tissue engineering; Citespace

**Funding:** Construction Project of Liu Zhaochun Inheritance Studio for Famous Traditional Chinese Medicine in Shandong Province, No. [2018] 1 (to HHL)

**How to cite this article:** DANG XW, HUANG HL, HUANG L, WANG YJ. Research frontiers and hotspots of carbon nanomaterials in biomedical field over the past 10 years. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2025;29(4):752-760.

## 0 引言 Introduction

碳纳米材料是一组由碳元素组成的、纳米级别的天然或人造碳质材料,一般根据结构和尺寸分为零维碳纳米材料(富勒烯、纳米金刚石、碳点)、一维碳纳米材料(碳纳米管、金刚石纳米棒、碳纳米纤维)、二维碳纳米材料(石墨烯及其衍生物、金刚石纳米片)和三维碳纳米材料(类金刚石碳膜、纳米晶金刚石薄膜和富勒石)<sup>[1]</sup>。碳纳米材料作为纳米材料领域的一种新材料,在电子、热、光子、磁性和机械等方面表现出独特性能,被广泛用于工程化工、环境科学、能源材料和生物医学等不同领域<sup>[2-6]</sup>。近年来,随着“纳米医学”的发展,碳纳米材料因体积小、表面积大、表面易改性强和生物相容性高等优点,迅速成为药物递送、组织工程、癌症诊疗、生物成像、生物传感及抗菌等生物医学应用的重点关注材料<sup>[7-9]</sup>,各位学者也在不断深化对其的探索,研究规模随之扩大,文献数量逐年增加。然而面对众多的优秀科研成果,很难确定该领域的研究重点和发展趋势。因此文章梳理近 10 年生物医学领域碳纳米材料的发展脉络,分析其研究热点及预测研究趋势。

文献计量学通过运用数学和统计学的方法,定量定性分析某一领域的发展现状,探索研究热点与前沿,并对后续研究提供参考意义<sup>[10]</sup>。Citespace 是科学优秀的文献计量工具,它通过直观清晰的可视化知识图谱说明文献间的潜在关系,以探寻出此领域发展的关键路径及其知识拐点<sup>[11]</sup>。文章对近 10 年 Web of Science

数据库中关于生物医学领域碳纳米材料研究的相关文献进行统计与可视化分析,根据发文量、研究主题及研究内容总结归纳其研究现状,客观分析研究热点与趋势,以期为后续研究工作提供参考。

## 1 资料和方法 Data and methods

**1.1 资料来源** 以 Web of Science 核心集数据库为检索数据来源。设定检索策略为: #1 (TS=(carbon nanomaterials)) OR TS=(carbon-based nanomaterials); #2 (TS=(medicine)) OR TS=(biomedical sciences); #3 #1 AND #2。检索时间设定为 2012-01-01/2023-09-01,文献类型设定为“Article”和“Review”,语言类型为英文,共检索到 3 652 条文献。人工剔除与主题无关或相关度低的文献,最终纳入符合要求的文献 2 932 篇。

**1.2 数据分析方法** 将筛选后的文件以纯文本形式导出,其中包括文献全记录与引用的参考文献。使用 Excel 相关功能对年发文量、国家、机构、作者和关键词情况进行图表制作并分析;将文献数据导入 Citespace 6.2.R4 软件中并新建项目,具体参数设置如下:时间跨度 2012 年 1 月至 2023 年 9 月,时间切片为 1 年;节点类型根据需求依次选择国家/机构/作者/关键词/共被引文献。关联算法选择 cosine(余弦)和 within slices(切片内);节点阈值选择 g-index(g 指数);裁剪算法选择 Pruning(寻径)。

**1.3 主要观察指标** Excel 图表中主要研究指标为年发文量、发文量排名前

10 的国家、中心性排名前 10 位的国家、载文量排名前 10 位的机构及所属国家、发文量排名前 5 位的作者及单位、关键词频次及中心性、高被引文献发表年份、被引频次及主要内容;Citespace 生成可视化图谱中,主要研究指标为国家、机构、作者、关键词、共被引文献,在共现图谱中主要指标包括节点数量、大小、颜色和中介中心性;聚类图谱中的 Modularity Q(聚类模块值)、Mean silhouette S(聚类平均模块值);突现图谱中的 strength(强度)和 time(时间);时间线图的时间及颜色。

## 2 结果 Results

**2.1 发文量分析** 文献的年发文量是衡量某一领域研究热度和发展现状的重要指标,并在一定程度上可以预测该领域的未来动态<sup>[12]</sup>。如图 1 所示,碳纳米材料在医学领域的年发文量整体上呈上升趋势,以上升趋势分为 3 个阶段。2012-2017 年为阶梯式上升期,该时期文献数量缓慢增长,是各国学者将碳纳米材料应用到生物医学领域的初步探索;2017-2019 年为稳步发展期,此阶段发文量稍有增长;2019-2022 年为快速增长期,这一阶段文献数量增长明显,此时“纳米医学”理论研究热度较高<sup>[13-14]</sup>,对碳纳米材料在生物医学领域的发展产生良性影响。同时线性预测模型表明:生物医学领域碳纳米材料发文量与年份之间有显著相关关系且相关系数较高( $R=0.8664$ ),由此可认为未来此领域将持续受到研究者的关注,发文量将持续增长。

## 2.2 研究主体

**2.2.1 国家分析** 图2及表1, 2列出了生物医学领域碳纳米材料相关研究的国家共现图谱、文献数量和中心性排名前10位的国家。图2为Citespace软件生成的国家共现网络图谱, 文章共纳入发文国家97个, 连线数达997条, 网络密度为0.182。综合分析文献数量和中心性发现, 中国、美国和伊朗在该领域研究成果可观, 是碳纳米材料在生物医学领域研究的中坚力量。印度、美国和日本在这一领域与其他国家联系较为密切, 在国际上的影响力也较大。中国虽然发文量排名第一, 但中心性仅为0.03, 表明中国在该领域研究水平还有待提高, 应加强与其他国家的合作, 增强国际影响力。

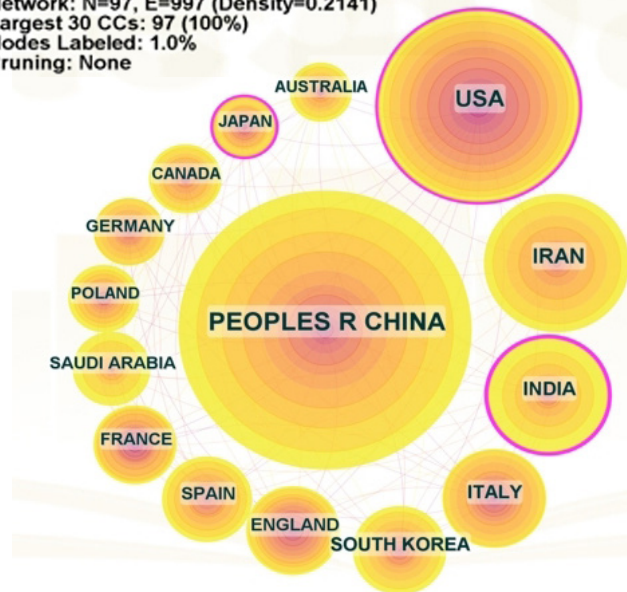
**2.2.2 机构分析** 表3列出碳纳米材料在生物医学领域研究的前10位机构显示, 有3所机构来自中国, 总计发文309篇, 在此研究领域遥遥领先。图3为该领域核心机构合作共现图谱, 文章共提取278个机构, 连线数为377条, 网络密度仅为0.0098。最大的合作网络是以中国科学院为中心的合作机构, 其中与其直接合作的机构有9所, 合作发表185篇文章, 主要合作对象为国内研究机构, 缺少与国外知名单位的合作, 表明中国各研究机构需加强国际间的合作, 关注国际发展热点, 不断交流学习, 弥补自身发展短板, 提高中国在生物医学领域碳纳米材料研究的国际影响力。

**2.2.3 作者分析** 对纳入文献的作者及发文量分析, 见表4, 其中包括546位作者, 发文量最多的是来自法国国家科学中心的Bianco, Alberto教授, 发表该领域相关文章24篇。根据普莱斯定律通过最高发文量可以得到核心作者的最低发文量  $N=0.749 \times \eta_{\max}^{1/2}$  ( $\eta_{\max}$  为最高产出量作者的发文量) 且核心作者将完成该领域一半以上的论文<sup>[15]</sup>。文章的  $\eta_{\max}=24$ , 由此得出  $N \approx 4$ , 即发文量在4篇及以上的作者为核心作者, 共66位, 总计发文426篇, 占总发文量的14.5%, 未达到总发文量的1/2, 这说明核心作者贡献率低, 学术水平有待提高。表4列出了此领域发文量排名前5位的核心作者, 其中Bianco,



图1 | 生物医学领域碳纳米材料研究发文量趋势图

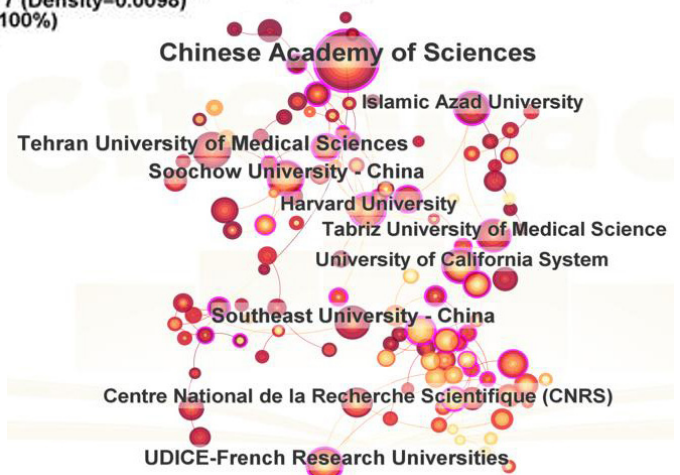
CiteSpace, v. 6.2.R4 (64-bit) Basic  
September 28, 2023 at 9:10:38 PM CST  
WoS: D:\碳纳米材料\data  
Timespan: 2012-2023 (Slice Length=1)  
Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LB=5, e=1.0  
Network: N=97, E=997 (Density=0.2141)  
Largest 30 CCs: 97 (100%)  
Nodes Labeled: 1.0%  
Pruning: None



图注: 圆圈代表国家, 圆圈大小代表发文量多少, 圆圈越大, 发文量越多; 连线代表合作关系, 连线越密集, 合作越密切; 最外层紫圈表示国家中心性大于0.1, 表明其在该领域的合作度和影响力都较高。

图2 | 生物医学领域碳纳米材料研究的国家可视化图

CiteSpace, v. 6.2.R4 (64-bit) Basic  
September 29, 2023 at 9:14:58 AM CST  
WoS: D:\碳纳米材料\data  
Timespan: 2012-2023 (Slice Length=1)  
Selection Criteria: g-index (k=12), LRF=3.0, L/N=10, LB=5, e=1.0  
Network: N=278, E=377 (Density=0.0098)  
Largest 30 CCs: 278 (100%)  
Nodes Labeled: 1.0%  
Pruning: Pathfinder



图注: 节点代表机构, 节点大小代表机构载文量的多少, 圆圈越大, 载文量越多; 连线代表合作关系, 连线越密集, 合作越密切; 最外层紫圈表示机构中心性大于0.1, 表明其在该领域的合作度和影响力都较高。Chinese Academy of Science 为中国科学院; Tehran University of Medical Sciences 为德黑兰大学; Southeast University-China 为东南大学; Soochow University-China 为苏州大学; UDICE-French Research Universities 为法国研究型大学联盟; Centre National de la Recherche Scientifique 为法国国家科学研究中心; Harvard University 为哈佛大学; Tabriz University of Medical Science 为大不里图医科大学; University of California System 为加州大学; Islamic Azad University 为阿扎德大学。

图3 | 生物医学领域碳纳米材料研究的机构可视化图

Alberto 教授发文 24 篇位居榜首，其研究方向主要在设计适用于疾病诊断、治疗和成像的多功能碳纳米材料<sup>[16]</sup>。来自中国的 Zhou, Ruhong 教授发表文章 14 篇，位列第 4 位，其主要从事碳纳米材料与肿瘤药物的研究，并取得一系列突破性进展<sup>[17]</sup>。

### 2.3 研究内容

**2.3.1 关键词分析** 关键词是对文章核心内容的高度凝练，能在一定程度上反映此领域的研究热点<sup>[18]</sup>。

关键词出现的次数为频次，频次越高则研究越深入；关键词在研究中的位置为中心性，中心性越高则关键词的位置越重要<sup>[19]</sup>。使用 Citespace 软件对文献频次及中心性进行统计分析，列出排名前 10 位的关键词，见表 5。

其中频次最高的关键词是 *in vitro* (429 次)，说明了体外实验是碳纳米材料应用于生物医学领域的研究基础。中心性最高的是 cancer (0.44)，表明癌症医学在此领域的研究较为集中，处于中心位置。

通过表 5 和图 4 发现，碳纳米管和氧化石墨烯的频次和中心性都较高，说明有关研究相对较多，是此领域探索最深入的碳纳米材料。在研究内容方面，碳纳米材料的毒理学研究在这 10 年中一直备受关注。

此外，关键词的突现词也可以展示该领域的研究热点与前沿，而且还可以呈现出该领域研究热点的时间演变情况<sup>[20]</sup>。使用 Citespace 软件对文献关键词进行突现分析见图 5。在爆发力最强的前 15 个突现词中，mice(小鼠)的爆发强度最大，这说明碳纳米材料再生医学领域的研究还处于体外细胞培养和体内动物实验的阶段，实现临床应用需进一步探索。

其次 carbon dot(碳点)爆发强度位居第二，且其爆发时间开始于 2021 年，并在 2023 年持续爆发，说明碳点作为新颖的碳纳米材料将在未来几年持续受到关注，是该领域的研究前沿。碳点因具有低细胞毒性、水溶性和易改性等独特优势在生物传感、生物成像、药物递送、生物抗菌及靶向给药等方面都展现出优越潜力<sup>[21-23]</sup>，其绿色合成的方式近年来也广受关注<sup>[24-25]</sup>。

**2.3.2 高被引文献分析** 高引用研究被认为是该领域最具影响力的研究<sup>[26]</sup>。共被引分析可用于查找引文

表 1 | 生物医学领域碳纳米材料研究的国家发文量分析

排名	国家	发文数量
1	CHINA(中国)	1 232
2	USA(美国)	591
3	IRAN(伊朗)	325
4	INDIA(印度)	228
5	ITALY(意大利)	175
6	SOUTH KOREA(韩国)	158
7	ENGLAND(英国)	145
8	SPAIN(西班牙)	129
9	GERMAN(德国)	101
10	SAUDI ARABIA(沙特阿拉伯)	100

表 2 | 生物医学领域碳纳米材料研究的国家中心性分析

排名	国家	中心性
1	INDIA(印度)	0.21
2	USA(美国)	0.15
3	JAPAN(日本)	0.11
4	IRAN(伊朗)	0.09
5	EGYPT(埃及)	0.09
6	SAUDI ARABIA(沙特阿拉伯)	0.08
7	RUSSIA(俄罗斯)	0.07
8	ITALY(意大利)	0.06
9	SPAIN(西班牙)	0.06
10	CANADA(加拿大)	0.06

表 3 | 生物医学领域碳纳米材料研究的机构分析

排名	研究机构	发文量	国家	中心性
1	Chinese Academy of Science(中国科学院)	185	中国	0.58
2	Tehran University of Medical Sciences(德黑兰大学)	68	伊朗	0.10
3	Southeast University-China(东南大学)	63	中国	0.01
4	Soochow University-China(苏州大学)	61	中国	0.16
5	UDICE-French Research Universities(法国研究型大学联盟)	60	法国	0.03
6	Centre National de la Recherche Scientifique(法国国家科学研究中心)	57	法国	0.05
7	Harvard University(哈佛大学)	51	英国	0.50
8	Tabriz University of Medical Science(大不里图医科大学)	51	伊朗	0.19
9	University of California System(加州大学)	51	美国	0.28
10	Islamic Azad University(阿扎德大学)	50	伊朗	0.26

表 4 | 生物医学领域碳纳米材料研究的核心作者分析

排名	作者	发文量	作者机构	国家
1	Bianco, Alberto	24	法国国家科学中心	法国
2	Fadeel, Bengt	21	瑞典环境医学研究所	瑞典
3	Kostarelos, Kostas	20	曼彻斯特大学	英国
4	Zhou, Ruhong	14	浙江大学	中国
5	Prato, Maurizio	12	的里亚斯特大学	意大利

表 5 | 生物医学领域碳纳米材料研究的关键词分析

排名	关键词	频次	中心性
1	<i>in vitro</i> (体外实验)	429	0.08
2	walled carbon nanotubes(碳纳米管)	324	0.13
3	graphene oxide(氧化石墨烯)	313	0.11
4	quantum dots(量子点)	309	0.06
5	toxicity(毒性)	257	0.04
6	oxidative stress(氧化应激)	239	0.10
7	cytotoxicity(细胞毒性)	179	0.09
8	photothermal therapy(光热治疗)	131	0.20
9	cancer(癌症)	90	0.44
10	sensitine detection(灵敏检测)	85	0.21

中最重要的参考文献，分析这些文章可以阐述该领域最前沿研究背后的演变情况以及对发展趋势和未来研究方向作出合理判断<sup>[27]</sup>。使用 Citespace 软件进行文献共被引分析。其中被引次数最多的文献主要介绍了碳纳米材料在生物成像和纳米药物治疗中的应用<sup>[28]</sup>。其次采用 LLR 算法进行聚类，运行结果如图 6 所示。聚类模块值(Q)和聚类轮廓值(S)是评价聚类情况的重要指标，一般 Q 值大于 0.5，S 值大于 0.7 则被认为该

聚类结构显著，同质性高，结果令人信服<sup>[29]</sup>，文章列举了共被引频次前 5 位的文献<sup>[28, 30-33]</sup>，见表 6。共生成 11 个聚类，其中 Q=0.835 6 > 0.5，S=0.930 9 > 0.7，表明聚类合理，可信度高。聚类标签从 0 开始，数值越小，其规模越大。对聚类标签进一步分析，可分为 3 个领域：①围绕碳纳米材料的毒理学研究，包含“#0 *vitro* study(体外研究)、#1 pulmonary toxicity(肺毒性)、#6 surface chemical modication(表面修饰)”；②基于碳

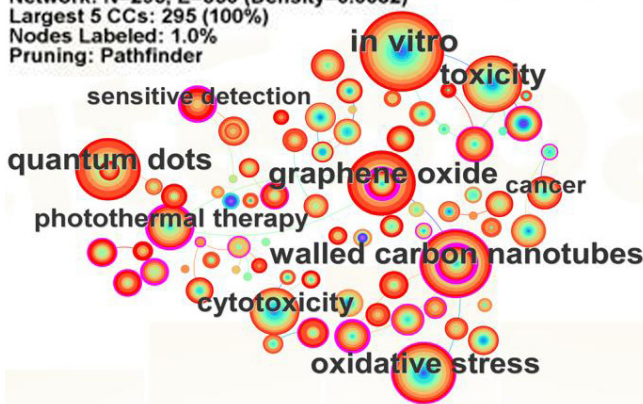
纳米材料本身材料研究, 包含“#2 carbon-based nanozymes(碳纳米酶)、#7 carbon dot(碳点)”；③碳纳米材料在医学领域的应用研究, 包含“#3 inorganic nanobiomaterial drug carrier(有机纳米双材料药物载体)、#4 cardiac tissue engineering(心脏组织工程)、#5 tissue engineering(组织工程)、#8 nerve repair(神经修复)、#9 theranostics(治疗诊断学)、#10 cancer phototherapy(癌症光疗法)。通过以上可以看出研究最广泛的是碳纳米材料在生物医学领域的具体应用, 尤其在癌症和组织工程方面。

为了进一步揭示生物医学领域碳纳米材料的研究热点和发展趋势, 对前11个聚类绘制时间线图, 见图7。结合共被引聚类图谱, 发现该领域的相关研究中, 对碳纳米管和氧化石墨烯的探索较为深入, 而碳量子点和碳纳米酶是相对较新的材料。在研究内容方面, 对碳纳米材料在药物递送方面研究的时间早, 而组织工程领域时间更长, 尤其近年来, 心脏组织工程、神经组织工程成为新的研究热点。同时体外研究、肺毒性、表面修饰的探索开始时间更早、持续时间更长, 虽相关研究的热度随时间变化也稍有降低, 但其中出现某些暖黄色节点, 说明了生物医学领域碳纳米材料的安全性研究一直以来备受关注, 是该领域稳定长期发展的重要基础。

### 3 讨论 Discussion

**3.1 研究概况** 文章借助 Citespace 文献计量学软件对 Web of Science 核心集数据库中生物医学领域碳纳米材料的相关文献进行可视化研究。近10年该领域的文献数量正在增加, 整体呈上升趋势, 尤其在2019-2022年的年发文量快速增长, 表明该领域迎来研究的黄金期。2023年仅导入9个月的数据已达到301篇, 同时线性预测模型也显示出2023年有远超之前的趋势。因此, 研究者们预测未来几年会有更多优秀研究成果出现。中国在此领域发表的文献最多, 遥遥领先其他国家, 这与中国政府的支持和投入密不可分。尽管中国在这一领域研究成果可观, 但与其他国家合作少, 发文核心机构、文献核心作者的影响

CiteSpace, v. 6.2.R6 (64-bit) Basic  
January 13, 2024 at 11:29:39 AM CST  
WoS: D:\碳纳米材料\data  
Timespan: 2012-2023 (Slice Length=1)  
Selection Criteria: g-index (k=10), LRF=3.0, L/N=10, LB=5, e=1.0  
Network: N=295, E=356 (Density=0.0082)  
Largest 5 CCs: 295 (100%)  
Nodes Labeled: 1.0%  
Pruning: Pathfinder



图注: 图中每一个节点代表一个关键词, 节点之间连线代表关键词之间的联系, 连线颜色暖时间越暖则时间越晚, 反之亦然。in vitro 为体外实验, walled carbon nanotubes 为碳纳米管, graphene oxide 为氧化石墨烯, quantum dots 为量子点, toxicity 为毒性, Oxidative stress 为氧化应激, cytotoxicity 为细胞毒性, photothermal therapy 为光热治疗, cancer 为癌症, sensitive detection 为灵敏检测。

图4 | 生物医学领域碳纳米材料研究的关键词共现图

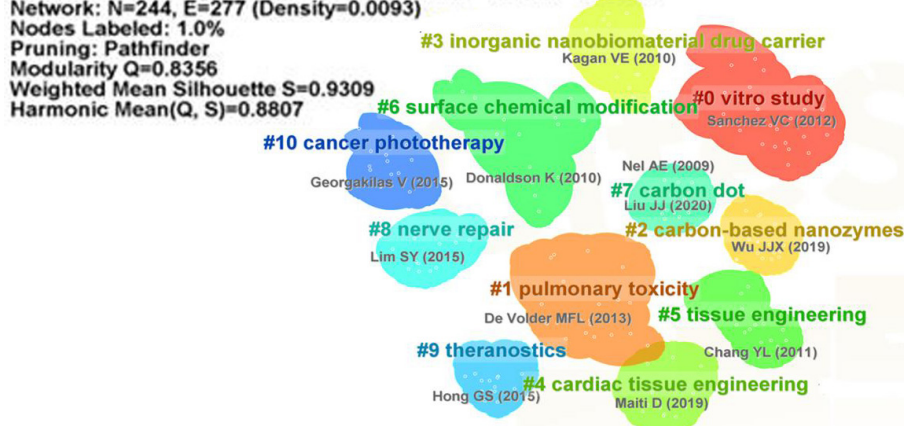
### Top 15 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2012 - 2023
mice	2012	12.79	2012	2016	
exposure	2012	8.74	2012	2013	
toxicity	2012	8.08	2012	2013	
functionalization	2012	8.03	2012	2015	
lung	2012	7.34	2012	2014	
particles	2012	7.24	2012	2013	
biocompatibility	2012	7.09	2012	2015	
translocation	2012	6.82	2012	2014	
pulmonary toxicity	2013	7.99	2013	2016	
carbon nanotubes	2012	7.52	2013	2014	
films	2014	7.66	2014	2015	
antibacterial activity	2019	6.93	2020	2023	
carbon dots	2017	11.23	2021	2023	
green synthesis	2014	8.96	2021	2023	
targeted drug delivery	2017	7.21	2021	2023	

图注: 蓝色代表关键词存在的时间范围, 红色代表关键词爆发、维持热度的时间段。Mice 为小鼠, exposure 为暴露, toxicity 为毒性, functionalization 为功能化, lung 为肺, particles 为颗粒, biocompatibility 为生物相容性, translocation 为传感, pulmonary toxicity 为肺毒性, carbon nanotubes 为碳基纳米管, films 为成膜, antibacterial activity 为抗菌治疗, carbon dots 为碳点, green synthesis 为绿色合成, targeted drug delivery 为靶向给药。

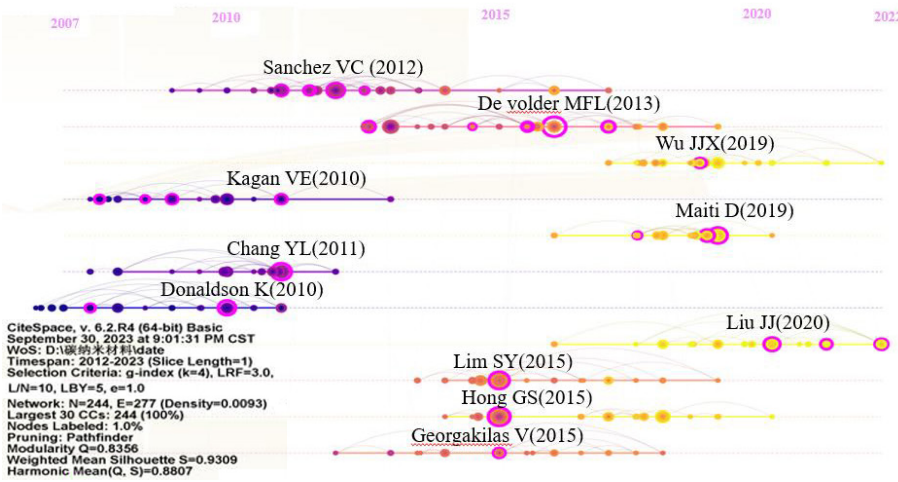
图5 | 生物医学领域碳纳米材料研究的关键词实现词分析图

CiteSpace, v. 6.2.R4 (64-bit) Basic  
September 30, 2023 at 9:01:31 PM CST  
WoS: D:\碳纳米材料\data  
Timespan: 2012-2023 (Slice Length=1)  
Selection Criteria: g-index (k=4), LRF=3.0, L/N=10, LB=5, e=1.0  
Network: N=244, E=277 (Density=0.0093)  
Nodes Labeled: 1.0%  
Pruning: Pathfinder  
Modularity Q=0.8356  
Weighted Mean Silhouette S=0.9309  
Harmonic Mean(Q, S)=0.8807



图注: 图中每一种颜色的区域代表一个聚类, 聚类标签从0开始, 数值越小, 其规模越大。包括#0到#10, 共有11个聚类。左上角有聚类模块值(Q)=0.8356和聚类轮廓值(S)=0.9309。#0 vitro study 为体外研究, #1 pulmonary toxicity 为肺毒性, #2 carbon-based nanozymes 为碳纳米酶, #3 inorganic nanobiomaterial drug carrier 为有机纳米双材料药物载体, #4 cardiac tissue engineering 为心脏组织工程, #5 tissue engineering 为组织工程, #6 surface chemical modification 为表面修饰, #7 carbon dot 为碳点, #8 nerve repair 为神经修复, #9 theranostics 为治疗诊断学, #10 cancer phototherapy 为癌症光疗法。

图6 | 生物医学领域碳纳米材料研究的引文聚类分析图



- #0 vitro study
- #1 pulmonary toxicity
- #2 carbon-based nanozymes
- #3 inorganic nanobiomaterial drug carrier
- #4 cardiac tissue engineering
- #5 tissue engineering
- #6 surface chemical modification
- #7 carbon dot
- #8 nerve repair
- #9 theranostics
- #10 cancer phototherapy

图注：图中节点在横轴上的位置表示首次出现的时间节点，连线表示共引关系。节点的大小与引用次数呈正相关，颜色越暖则时间越晚，反之亦然。  
#0 vitro study 为体外研究，#1 pulmonary toxicity 为肺毒性，#2 carbon-based nanozymes 为碳纳米酶，#3 inorganic nanobiomaterial drug carrier 为有机纳米材料药物载体，#4 cardiac tissue engineering 为心脏组织工程，#5 tissue engineering 为组织工程，#6 surface chemical modification 为表面修饰，#7 carbon dot 为碳点，#8 nerve repair 为神经修复，#9 theranostics 为治疗诊断学，#10 cancer phototherapy 为癌症光疗法。

图 7 | 生物医学领域碳纳米材料研究的文献共被引时间线图

表 6 | 生物医学领域碳纳米材料研究的高被引文献 TOP5

第一作者	题目	研究主要内容	被引次数
HONG <sup>[28]</sup>	Carbon Nanomaterials for Biological Imaging and Nanomedical Therapy (碳纳米材料在生物成像和纳米药物中的应用)	碳纳米材料在生物成像和纳米药物治疗中的应用。碳纳米管、碳纳米角、碳纳米离子、碳纳米金刚石和不同的石墨烯衍生物，这些材料目前用于生物学和医学的体外和体内成像。概述一些诊断特征(即成像)与细胞特异性靶向和治疗方法	59
SANCHEZ <sup>[29]</sup>	Biological interactions of graphene-family nanomaterials: an interdisciplinary review (石墨烯家族纳米材料的生物相互作用: 跨学科综述)	石墨烯家族与核酸、脂质双层以及偶联小分子药物和染料之间的几种独特相互作用模式会导致生物毒性。石墨烯家族纳米材料具有空气动力学尺寸，可导致吸入和大量沉积在人体呼吸道中，这可能会损害肺防御和清除，从而导致肉芽肿和肺纤维化的形成。静脉给药后石墨烯家族纳米材料，具有全身生物分布和生物持久性，有可能诱发异物肿瘤	55
LIM <sup>[31]</sup>	Carbon quantum dots and their applications (碳量子点及应用)	碳量子点除了具有强大光学性能外，还具有低毒性、环境友好性、成本低、合成简单等优点。此外，碳量子点的表面钝化和功能化可以控制其物理化学性质，被广泛用于化学传感、生物传感、生物成像、纳米医学、光催化和电催化等领域	51
NEL <sup>[32]</sup>	Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface (了解纳米生物界面的生物物理化学相互作用)	纳米颗粒与蛋白质、膜、细胞、DNA 和细胞器相互作用的过程中可能具有生物相容性或生物不良结果。从安全使用纳米材料的角度出发，探索纳米材料特性(如尺寸、形状、表面化学、粗糙度和表面涂层)与其活性之间的关系	47
POLAND <sup>[33]</sup>	Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study (在一项初步研究中，引入小鼠腹腔的碳纳米管显示出类似石棉的致病性)	小鼠体腔的间皮内层当作胸腔间皮内层的替代物暴露于长多壁碳纳米管会导致炎症和肉芽肿的病变的形成。在碳纳米管引入临床市场前，要关注其长期危害。	44

力、合作力都较低。反观印度、美国、日本与其他国家的合作密切，在国际上形成一定影响力，合作优势十分明显。因此，研究者们要加强与其他国家的合作，提升中国在国际上的影响力。其次要进一步增加对研究机构、人才引进、学术交流的政策支持和财政投入，提高国内专家学者的积极性。此外，国内学者还要密切关注国际发展情况，积极参与或组织国际国内学术论坛等活动，加大合作广度和研究深度，不断提升自我科研水平和学术权威。

总之，生物医学领域碳纳米材料的研究已进入发展的高速期，目前主要集中在生物成像、传感、药物递送方面，现已有研究涉及皮肤、口腔护理领域，在不久的将来，碳纳米材料

的应用将更为广泛。  
**3.2 热点与前沿分析** 研究热点是指某一段时间此领域共同关注的学术话题<sup>[34]</sup>。关键词是作者核心思想的提炼与精髓，对关键词分析可以发掘当前研究的重点，推测研究领域的热点方向<sup>[35]</sup>。文章通过对关键词的频次和中心性进行统计分析并绘制关键词共现和突现词图谱总结发现：“癌症”相关研究出现较多，成为当前碳纳米材料在生物医学领域研究的重点。据报道，癌症已成为人类死亡的主要原因之一，多数用于癌症的治疗方法具有不良反应且疗效维持时间短<sup>[36-38]</sup>。碳纳米材料因其独特的物理特性在癌症检测、药物递送、成像和基因治疗中发挥重要作用。HAN 等<sup>[39]</sup>利用经过掺杂的碳量子点来增强荧光，进而灵

敏检测癌症的生物标志物。有研究表明，碳纳米材料具有良好的生物相容性、深层组织扩散性并且近红外范围内具有良好的光热转换能力，被广泛用于癌症的光疗治疗中<sup>[40]</sup>。LIU 等<sup>[41]</sup>报道制备了一种石墨氮化碳纳米片的多功能纳米平台用于增强光疗效率，其在激光下表现出强烈的光热效应，实现高效协同抗癌。AHMAD 等<sup>[42]</sup>通过经修饰氧化石墨烯增加近红外吸收性能，增强光疗强度和生物相容性来攻击癌细胞。此外碳纳米材料经过表面化学修饰还可提高结构的稳定性，调节亲水性，同时增强治疗效果和生物活性，降低免疫反应。有研究发现酸化的碳纳米管与光疗相结合可以治疗乳腺癌，并且研究还发现酸功能化的碳纳米管低温联合治疗肿瘤

中, T 细胞和巨噬细胞显著增加<sup>[43]</sup>。AOKI 等<sup>[44]</sup>发现糖化壳聚糖碳纳米管通过光疗能刺激自然杀伤癌细胞, 促进巨噬细胞的增值和活化, 协同实现免疫介导的肿瘤转移抑制。因此, 使用碳纳米材料与光疗、免疫疗法相结合是未来的研究中不可避免的热点。目前光疗和免疫疗法在癌症治疗领域取得了突破性进展。碳纳米材料因其独特的导热性、电学性能和比表面积被作为调节剂引起研究者的极大兴趣, 虽提高了治疗的靶向性和效果, 但仍需解决其溶解度和生物利用度的问题。

此外, 通过对文献共被引分析也可挖掘碳纳米材料在生物医学领域研究中的热点与前沿<sup>[45]</sup>。碳纳米材料在组织工程中的应用是近年来研究的热点<sup>[46]</sup>。组织工程是由生物材料支架、种子细胞、有利的外部环境 3 个基本要素构成。碳纳米材料独特的机械、电学、光学特性以及化学成分和物理特性使其成为组织工程中各种支架中的增强材料, 还是靶向负载种子细胞到特定组织系统中的载体, 还能提供与生物细胞外基质相似的微环境。因此碳纳米材料作为新型生物材料在组织工程中具有巨大潜力, 心脏组织工程和神经组织工程的研究逐年增多。近年来心脏组织工程相关的一系列研究表明, 在组织支架中掺入碳纳米材料可以改善心肌细胞的电偶联、支架的压缩模量以及心肌细胞的成熟和增殖。SHIN 等<sup>[47]</sup>的研究也支持含碳纳米材料的支架可以增强心肌细胞的分化与增殖, 而且基于碳纳米材料支架培养的心肌细胞具有活力和黏附性。WU 等<sup>[48]</sup>发现, 含碳纳米材料的支架可以提高心肌细胞的黏附性, 但心肌细胞的活力未增加。还有学者进一步观察发现, 在含有碳纳米材料的涂层玻璃基板上培养的心肌细胞形态得到改善, 形成明显的膜分离和桥粒<sup>[49]</sup>。神经组织工程领域目前碳纳米材料的相关研究主要集中在病变神经组织的修复和再生以及刺激神经细胞生长的应用中。TUPONE 等<sup>[6]</sup>用壳聚糖对氧化石墨烯进行官能化, 形成表面附着胶原蛋白壳聚糖的复合水凝胶, 被证明有利于神经元的生长和分化。除了促进神经

元分化来代替受损组织外, 石墨烯碳纳米片材料还可以直接作为电极刺激神经再生。FENG 等<sup>[50]</sup>将石墨烯包裹到导电纳米纤维支架上, 在电刺激下培养的神细胞实现了初级神经元增殖和分化的加速。YAN 等<sup>[51]</sup>也曾使用类似方法用于视神经的恢复中, 同样也取得良好效果。

3D 生物打印和 4D 生物打印与碳纳米材料的融合也成为组织工程中突出的研究热点。有学者指出石墨烯油墨改性剂有助于多功能组织工程支架的 3D 生物打印, 其可以在保持印刷适应性的情况下提高支架的机械性能<sup>[52-53]</sup>。ZHANG 等<sup>[54]</sup>还发现 3D 打印石墨烯具有优秀的生物相容性, 能促进小胶质生成。4D 生物打印是一种更先进的生物打印形式, 4D 生物打印可制造出动态生物结构, 能更准确地模拟组织和器官的体内反应<sup>[55-57]</sup>。MIAO 等<sup>[58]</sup>就创建了石墨烯混合 4D 生物打印结构的智能神经引导导管, 该导管被用于神经组织工程领域。然而当前 4D 生物打印还是一个较新领域, 相信其与碳纳米材料相结合将成为更准确、更适用于患者的新一代组织工程。

总之, 碳纳米材料是用于组织工程领域的先进材料, 其性能独特, 有利于改善作用持续时间、组织载量等问题。目前碳纳米材料主要被用于支持组织再生或修复各种聚合物贴片或支架上, 但需要明确实现组织工程的机制, 如机械转导、导电率和机械性能等。

**3.3 碳纳米材料在生物医学领域面临的挑战** 碳纳米材料因其独特的物理特性已被广泛应用于生物医学领域<sup>[59-60]</sup>, 但与此同时其在临床应用中仍面临着巨大挑战。首先, 碳纳米材料的生物安全性引起学者们的担忧<sup>[33-34]</sup>。现有的毒理学研究主要集中在石墨烯及其衍生物以及碳纳米管等少数常用的细胞毒性分子机制和短期毒性的探讨上, 而对于其余碳纳米材料的细胞毒性和长期影响还存在探索空间<sup>[61-63]</sup>。其次, 碳纳米材料在生物医学领域的应用中通常与其他生物大分子、表面改性剂等配合使用来提高性能, 这也进一步增加了对安全性评估的难度。此外基于碳纳米材料生产的医疗

制剂、支架及设备等的合成、设计过于复杂, 不利于其重复、大规模、经济高效生产, 严重阻碍其用于临床实践中。因此, 研究者们要加强细胞毒性分子机制的研究, 评估其潜在的长期毒性作用并对不同的碳纳米材料进行比较研究。此外, 还要开发简单有效的技术促进碳纳米材料在生物医学领域的具体应用, 发挥其的最大潜力。

碳纳米材料在生命体中的生物特性是决定其价值的重要评判标准。碳纳米材料的降解问题及吸附引起的纳米毒性问题仍未得出统一意见。目前急需建立生物系统相容性和安全性评价体系, 同时做好筛选和风险收益评估。

**3.4 既往他人该领域研究的贡献和存在问题** 基于既往科研人员的探索, 碳纳米材料在生物医学领域涌现出丰富的研究成果, 深入探索了其在药物递送、生物传感/成像、抗菌治疗等子领域的作用, 在癌症检测、靶向给药、肿瘤疫苗方面也获得一定成果, 但针对于癌症治疗的新方法, 如光疗、免疫疗法开展的研究成果还较少。其次碳纳米材料在组织工程中的研究也较多, 但主题较为单一, 主要集中于骨组织工程方向, 而对于其他方面的探索较为有限。除此之外, 关于碳纳米材料的类型研究也相对集中, 如碳纳米管、石墨烯及其衍生物, 而其余碳纳米材料的属性及应用的开展与其潜在价值存在较大差距。除以上问题外研究者们还发现, 碳纳米材料在生物医学领域的研究多以体外实验的形式展开, 在严格把关、程序清晰的实验室中碳纳米材料分散技术逐步完善, 生物动力学评估方法的阵列正在增加并取得令人满意的效果, 但碳纳米材料的积极意义在于临床应用, 如何科学可靠评估碳纳米材料的安全性, 从而实现碳纳米材料从实验室到临床的转换、真正作用于临床还需未来研究者们思考。

**3.5 作者综述区别于他人他篇的特点** 首先文章运用文献计量学的方法, 使用可视化图谱的形式, 从整体的角度出发, 直观清晰阐述碳纳米材料在生物医学领域的发展脉络。通过对研究主体拆解分析帮助未来研究者选择合适的合作对象, 更多角度结合关键

词、共被引综合分析,归纳研究热点,推测发展前沿,揭示当前碳纳米材料在生物医学领域面临的挑战。其次文章从宏观上考虑,全局梳理生物医学领域碳纳米材料的相关研究现状,近10年其发展迅速,目前仍有较大上升空间;研究方向与科学技术的发展密切相关,研究内容、主题也不断深化和细化。从研究内容和主题来看,涉及临床诊断治疗和细胞分子机制的不同方面,尤其对于碳纳米与新方法、新型聚合物或有机分子的合成和应用成为科研人员所关注的热点。从研究方向来看,未来研究将朝着开发量身定制的精准疗法的方向发展,与智能设备、3D、4D生物打印等科技相结合,以实现更精确、更专业、更个性化的医疗诊疗。

**3.6 综述的局限性** 文章基于Citespace软件对生物医学领域碳纳米材料的研究进行分析,由于数据库内容格式限制,仅纳入Web of Science一个数据库的相关文献,并且限制文献时间及语言类型,缺少中文数据库的相关文献。同时文章主要从宏观角度阐述该领域的发展情况,梳理研究热点与前沿,未来还需从个体和微观角度出发。

**3.7 综述的重要意义** 碳纳米材料在生物医学领域具有重要意义。基于其不同纳米结构和功能化,被用于各种病理的生物成像、检测和诊断,还是靶向递送药物的理想平台,同时极强的刚度、硬度及生物相容性也是组织工程支架的理想选择。碳纳米材料还具有较高的吸附能力,可用于吸附血液循环中的离子、药物和毒素等。文章综合分析探讨其发展现状及问题,帮助指导碳纳米材料的未来发展方向,为未来科研人员的研究提供参考。

**3.8 课题专家组对未来的建议** 近10年,科研人员已经对生物医学领域碳纳米材料展开了大量研究,认可其对于医学和保健领域的价值。然而由于碳纳米材料的生物安全性及生物降解性问题,使碳纳米材料的临床应用仍难以推进,因此完成安全性评估,使其适用于当前临床环境是目前工作的重中之重。创建科学有效的碳基体系,以安全符合伦理地方式进行临床测试,充分利用碳纳米材料的功能化,

以生物材料复合物的形式用于疾病的局部靶向给药,逐步向临床推进。中国作为此领域的新兴力量,要充分发挥本国优势,中药作为中国古代文化的瑰宝,富含多种有效成分,已有研究将中药作为碳源制备的原材料,从而有利于发挥更大药用价值。因此中国要充分利用中国特色,建立完善中国的碳纳米材料的研究体系,为人类生物医学与健康发展贡献新力量。

**致谢:** 感谢山东中医药大学老师和团队成员对文章写作的帮助。

**作者贡献:** 文章设计为第一作者及通讯作者共同完成。文献检索及分析数据为黄雷和王亚洁。第一作者成文。通讯作者审核。

**利益冲突:** 文章的全部作者声明,在课题研究过程和文章撰写过程中不存在利益冲突。

**开放获取声明:** 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

**版权转让:** 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

**出版规范:** 文章遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。文章出版前已经过专业剽窃文献检测系统进行3次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

## 4 参考文献 References

- [1] PATRICK B, AKHTAR T, KOUSAR R, et al. Carbon nanomaterials: emerging roles in immuno-oncology. *Int J Mol Sci.* 2023; 24(7):6600.
- [2] CUI F, LI T, WANG D, et al. Recent advances in carbon-based nanomaterials for combating bacterial biofilm-associated infections. *J Hazard Mater.* 2022;431: 128597.
- [3] TORRINHA A, OLIVEIRA TMBF, RIBEIRO FWP, et al. Application of nanostructured carbon-based electrochemical (bio)sensors for screening of emerging pharmaceutical pollutants in waters and aquatic species: a review. *Nanomaterials (Basel).* 2020;10: 1268.
- [4] INTISAR A, RAMZAN A, SAWAIRA T, et al. Occurrence, toxic effects, and mitigation of pesticides as emerging environmental pollutants using robust nanomaterials-A review. *Chemosphere.* 2022;293:133538.
- [5] FARRE M, KANTIANI L, PETROVIC M, et al. Achievements and future trends in the analysis of emerging organic contaminants in environmental samples by mass spectrometry and bioanalytical techniques. *J Chromatogr A.* 2012;1259:86-99.

- [6] TUPONE MG, PANELLA G, D'ANGELO M, et al. An update on graphene-based nanomaterials for neural growth and central nervous system regeneration. *Int J Mol Sci.* 2021;22:13047.
- [7] SADEGHI MS, SANGRIZEH FH, JAHANI N, et al. Graphene oxide nanoarchitectures in cancer therapy: drug and gene delivery, phototherapy, immunotherapy, and vaccine development. *Environ Res.* 2023;237: 117027.
- [8] LIU Y, LIU H, GUO S, et al. A review of carbon nanomaterials/bacterial cellulose composites for nanomedicine applications. *Carbohydr Polym.* 2024;323:121445.
- [9] CUI L, LIANG J, LIU H, et al. Nanomaterials for angiogenesis in skin tissue engineering. *Tissue Eng Part B Rev.* 2020;26(3):203-216.
- [10] XU X, SHEN Z, SHAN Y, et al. Application of tissue engineering techniques in tracheal repair: a bibliometric study. *Bioengineered.* 2023;14:2274150.
- [11] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能 [J]. *科学学研究*, 2015,33(2):242-253.
- [12] 贺雅洁, 王延博, 杨硕. 基于 CiteSpace 对中医药治疗子宫肌瘤的可视化分析 [J]. *世界中西医结合杂志*, 2022,17(12): 2374-2380.
- [13] PALMIERIV, DI PIETRO L, PERINI G, et al. Graphene oxide nano-concentrators selectively modulate RNA trapping according to metal cations in solution. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8:421.
- [14] DONG P, RAKESH KP, MANUKUMARH M, et al. Innovative nano-carriers in anticancer drug delivery-a comprehensive review. *Bioorg Chem.* 2019;85:325-336.
- [15] 谢恩礼, 陶慧敏. 血流限制训练在临床康复医学中的应用趋势 [J]. *中国组织工程研究*, 2024,28(2):258-262.
- [16] CELLOT G, JACQUEMIN L, REINA G, et al. Bonding of neuropeptide y on graphene oxide for drug delivery applications to the central nervous system. *ACS Appl Nano Mater.* 2022;5(12):17640-17651.
- [17] YE R, SONG W, FENG M, et al. Potential interference of graphene nanosheets in immune response via disrupting the recognition of HLA-presented KK10 by TCR: a molecular dynamics simulation study. *Nanoscale.* 2021;13(45):19255-19263.
- [18] 李一飞, 周开宇, 沈建通, 等. 基于关键词共现分析的我国先心病介入诊疗发展的可视化研究 [J]. *临床儿科杂志*, 2012,30(7):631-637.
- [19] 徐鹏, 赵京霞, 高铸焯, 等. 2012—2021 年国家自然科学基金脑卒中中医内科研究领域申请与资助分析 —— 基于 CiteSpace 的可视化分析 [J]. *长春中医药大学学报*, 2022,38(12):1311-1319.
- [20] LING L, OUYANG Y, HU Y. Research trends on nanomaterials in gastric cancer: a bibliometric analysis from 2004 to 2023. *J Nanobiotechnology.* 2023;21(1):2481.
- [21] LI X, VINOTHINI K, RAMESH T, et al. Combined photodynamic-chemotherapy investigation of cancer cells using carbon quantum dot-based drug carrier system. *Drug Deliv.* 2020;27(1):791-804.

- [22] SUN L, ZHANG R, ZHANG T, et al. Synthesis, applications and biosafety evaluation of carbon dots derived from herbal medicine. *Biomed Mater*. 2023. doi:10.1088/1748-605X/acdeb8.
- [23] KONG B, YANGT, CHENG F, et al. Carbon dots as nanocatalytic medicine for anti-inflammation therapy. *J Colloid Interface Sci*. 2022;611:545-553.
- [24] HE JH, CHENG YY, YANG T, et al. Functional preserving carbon dots-based fluorescent probe for mercury (II) ions sensing in herbal medicines via coordination and electron transfer. *Anal Chim Acta*. 2018;1035:203-210.
- [25] KANWAL A, BIBI N, HYDER S, et al. Recent advances in green carbon dots (2015-2022): synthesis, metal ion sensing, and biological applications. *Beilstein J Nanotechnol*. 2022;13:1068-1107.
- [26] 黄伟, 苏晓丽, 赵江宁, 等. 基于 CiteSpace 的严重创伤患者低体温研究的可视化分析 [J]. *临床医学研究与实践*, 2023,8(4):1-4.
- [27] 尤伟杰, 郭青, 张楠, 等. 基于关键词共现和文献共被引的医学期刊微信公众平台热点可视化分析 [J]. *中华医学图书情报杂志*, 2019,28(2):76-80.
- [28] HONG G, DIAO S, ANTARIS AL, et al. Carbon nanomaterials for biological imaging and nanomedicinal therapy. *Chem Rev*. 2015; 115(19SI):10816-10906.
- [29] 杨丽萍, 段培蓓, 杨玲, 等. 肿瘤患者疼痛 - 疲乏 - 睡眠障碍症状群的研究现状及热点可视化分析 [J]. *中华全科医学*, 2023,21(1):139-143.
- [30] SANCHEZ VC, JACHAK A, HURT RH, et al. Biological interactions of graphene-family nanomaterials: an interdisciplinary review. *Chem Rev*. 2012;25(1):15-34.
- [31] LIM SY, SHEN W, GAO Z. Carbon quantum dots and their applications. *Chem Res Toxicol*. 2015;44(1):362-381.
- [32] NEL AE, MAEDLER L, VELEGOL D, et al. Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Chem Soc Rev*. 2009;8(7):543-557.
- [33] POLAND CA, DUFFIN R, KINLOCH I, et al. Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nat Mater*. 2008;3(7):423-428.
- [34] 田娇, 赵锡丽, 冉倩. 基于 Web of Science 数据库的糖尿病饮食研究的可视化分析 [J]. *循证护理*, 2023,9(21): 3902-3908.
- [35] 邹婧, 楚尧娟, 杜秋争, 等. 酪氨酸激酶抑制剂在 HER2 阳性乳腺癌中应用的可视化分析 [J]. *中国药房*, 2023,34(24): 3036-3041.
- [36] HOSNEDLOVA B, KEPINSKA M, FERNANDEZ C, et al. Carbon nanomaterials for targeted cancer therapy drugs: a critical review. *Chem Rec*. 2019;19(2-3):502-522.
- [37] CHEN D, DOUGHERTY CA, ZHU K, et al. Theranostic applications of carbon nanomaterials in cancer: focus on imaging and cargo delivery. *J Control Release*. 2015;210:230-245.
- [38] SAJJADI M, NASROLLAHZADEH M, JALEH B, et al. Carbon-based nanomaterials for targeted cancer nanotherapy: recent trends and future prospects. *J Drug Target*. 2021;29(7):716-741.
- [39] HAN C, CHEN R, WU X, et al. Fluorescence turn-on immunosensing of HE4 biomarker and ovarian cancer cells based on target-triggered metal-enhanced fluorescence of carbon dots. *Anal Chim Acta*. 2021;1187: 339160.
- [40] LIU H, CHEN J, QIAO S, et al. Carbon-based nanomaterials for bone and cartilage regeneration: a review. *ACS Biomater Sci Eng*. 2021;7(10):4718-4735.
- [41] LIU C, QIN H, KANG L, et al. Graphitic carbon nitride nanosheets as a multifunctional nanoplatform for photochemical internalization-enhanced photodynamic therapy. *J Mater Chem B*. 2018;6(47):7908-7915.
- [42] AHMAD R, FU J, HE N, et al. Advanced gold nanomaterials for photothermal therapy of cancer. *J Nanosci Nanotechnol*. 2016;16(1):67-80.
- [43] RADZI M RM, JOHARI NA, ZAWAWI WFAW, et al. In vivo evaluation of oxidized multiwalled-carbon nanotubes-mediated hyperthermia treatment for breast cancer. *Biomater Adv*. 2022;134:112586.
- [44] AOKI K, SAITO N. Biocompatibility and carcinogenicity of carbon nanotubes as biomaterials. *Nanomaterials (Basel)*. 2020; 10:2642.
- [45] 王嘉响, 吴俏兰, 高祖, 等. 基于科学知识图谱的桔梗研究热点与趋势分析 [J]. *中医药导报*, 2023,29(10):110-118.
- [46] 张春婷, 李波, 谢立国, 等. 温泉微生物合成的碳纳米材料在生物成像方面的应用 [J]. *材料科学与工程学报*, 2023, 41(4):561-567.
- [47] SHIN SR, JUNG SM, ZALABANY M, et al. Carbon-nanotube-embedded hydrogel sheets for engineering cardiac constructs and bioactuators. *ACS Nano*. 2013;7(3):2369-2380.
- [48] WU Y, SHI X, LI Y, et al. Carbon nanohorns promote maturation of neonatal rat ventricular myocytes and inhibit proliferation of cardiac fibroblasts: a promising scaffold for cardiac tissue engineering. *Nanoscale Res Lett*. 2016; 11(1):284.
- [49] MARTINELLI V, CELLOT G, TOMA FM, et al. Carbon nanotubes promote growth and spontaneous electrical activity in cultured cardiac myocytes. *Nano Lett*. 2012;12(4):1831-1838.
- [50] FENG Z, WANG T, ZHAO B, et al. Soft graphene nanofibers designed for the acceleration of nerve growth and development. *Adv Mater*. 2015;27(41): 6462-6468.
- [51] YAN L, ZHAO B, LIU X, et al. Aligned nanofibers from polypyrrole/graphene as electrodes for regeneration of optic nerve via electrical stimulation. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2016;8(11):6834-6840.
- [52] JAKUS AE, SECOR EB, RUTZ AL, et al. Three-dimensional printing of high-content graphene scaffolds for electronic and biomedical applications. *ACS Nano*. 2015;9(4):4636-4648.
- [53] RAJA IS, KANG MS, HONG SW, et al. State-of-the-art techniques for promoting tissue regeneration: combination of three-dimensional bioprinting and carbon nanomaterials. *Int J Bioprint*. 2023;9(1): 181-198.
- [54] ZHANG J, EYISOYLU H, QIN X, et al. 3D bioprinting of graphene oxide-incorporated cell-laden bone mimicking scaffolds for promoting scaffold fidelity, osteogenic differentiation and mineralization. *Acta Biomater*. 2021;121:637-652.
- [55] JAKUS AE, SECOR EB, RUTZ AL, et al. Three-dimensional printing of high-content graphene scaffolds for electronic and biomedical applications. *ACS Nano*. 2015;9(4):4636-4648.
- [56] OSOULI-BOSTANABAD K, MASALEHDAN T, KAPSA RMI, et al. Traction of 3D and 4D printing in the healthcare industry: from drug delivery and analysis to regenerative medicine. *ACS Biomater Sci Eng*. 2022;8(7): 2764-2797.
- [57] POURMASOUMASOUMI P, MOGHADDAM A, MAHAND SN, et al. A review on the recent progress, opportunities, and challenges of 4D printing and bioprinting in regenerative medicine. *J Biomater Sci Polym Ed*. 2023;34(1):108-146.
- [58] MIAO S, CUI H, NOWICKI M, et al. Stereolithographic 4D bioprinting of multiresponsive architectures for neural engineering. *Adv Biosyst*. 2018;2:1800101.
- [59] QASIM M, CLARKSON ANN, HINKLEY SFR. Green synthesis of carbon nanoparticles (CNPS) from biomass for biomedical applications. *Int J Mol Sci*. 2023;24:1023.
- [60] ASHRAFIZADEH M, SAEBAR H, GHOLAMI MH, et al. Doxorubicin-loaded graphene oxide nanocomposites in cancer medicine: stimuli-responsive carriers, co-delivery and suppressing resistance. *Expert Opin Drug Deliv*. 2022;19(4):355-382.
- [61] RAJA IS, SONG S, KANG MS, et al. Toxicity of zero- and one-dimensional carbon nanomaterials. *Nanomaterials (Basel)*. 2019;9:1214.
- [62] JOHNSON AP, GANGADHARAPPA HV, PRAMOD K. Graphene nanoribbons: a promising nanomaterial for biomedical applications. *J Control Release*. 2020;325: 141-162.
- [63] RAHMAN MA, ABUL BARKAT H, HARWANSH RK, et al. Carbon-based nanomaterials: carbon nanotubes, graphene, and fullerenes for the control of burn infections and wound healing. *Curr Pharm Biotechnol*. 2022;23(12):1483-1496.

(责任编辑: WJ, ZN, QY, LWJ)